

Técnicas de monitoramento e modelagem na estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica ⁽¹⁾

Cláudia Alessandra Peixoto de Barros⁽²⁾; Elizeu Jonas Didoné⁽²⁾; Jean Paolo Gomes Minella⁽³⁾; Leandro Dalbianco⁽⁴⁾; Rafael Ramon⁽⁵⁾; Franciele de Bastos⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Pesquisa desenvolvida com apoio financeiro do CNPQ, FAPERGS e SINDITABACO.

⁽²⁾ Doutoranda (o), PPGCS, UFSM, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos. Av. Roraima 1000. CEP 97105-900, Santa Maria (RS). E-mail: dinhaufsm@gmail.com; didoneagroufsm@gmail.com ⁽³⁾ Professor Adjunto, Departamento de Solos, UFSM. E-mail: jminella@gmail.com; ⁽⁴⁾ Pós-Doutorando, PPGCS, UFSM, E-mail: agrodalbianco@gmail.com; ⁽⁵⁾ Graduando (a), Curso de Agronomia, UFSM. E-mail: rafaramon11@gmail.com, francieledebastos@gmail.com

RESUMO: O objetivo do trabalho foi avaliar três diferentes metodologias entre técnicas de monitoramento e modelagem matemática para a estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. Os parâmetros de três modelos de infiltração foram ajustados a um conjunto de dados coletados durante dois anos de monitoramento, em 10 eventos de chuva-vazão ocorridos sob diferentes condições de uso e manejo do solo numa bacia hidrográfica rural de 1,19 km² de área. O modelo LISEM e SSRRM apresentaram valores próximos de infiltração para os mesmos eventos, diferentemente dos valores do SCS – CN que na maioria dos eventos superestimou os valores, e ainda para dois eventos não gerou escoamento superficial. Observou-se com o uso do LISEM, que o uso de 20 % usado tradicionalmente pelo SCS – CN pode ter comprometido um melhor desempenho do SCS – CN, sendo necessário utilizar outro valor, de preferência valores medidos a campo.

Termos de indexação: variabilidade espacial e processos hidrológicos.

INTRODUÇÃO

O desencadeamento de processos hidrológicos como o escoamento superficial, a erosão e o transporte de solutos são controlados pela variabilidade da infiltração de água no solo, a qual é influenciada pela heterogeneidade espacial do relevo e do solo, e também pela alteração espacial e temporal do uso do solo e da variação climática. Todavia, a variabilidade da infiltração, devido seus fatores controladores, incorpora um alto grau de incertezas na sua representatividade (Langhans et al. 2010).

Em ambientes heterogêneos, tal como na escala de bacia hidrográfica, aumentam as dificuldades operacionais e incertezas quanto à representatividade dos métodos de estimativa da infiltração. A medição da infiltração pode ser realizada através do emprego de diferentes

métodos. Todavia, os resultados obtidos por tais metodologias representam situações homogêneas de uso, manejo, relevo e solo, indicando que a extrapolação para diferentes escalas pode incorrer em erros significativos. Isso é especialmente importante quando o sistema de interesse é a bacia hidrográfica, em que o escoamento não é controlado apenas pelo processo Hortoniano, mas também pela dinâmica das áreas de afluência variável (Beven & Kirkby, 1979; Rose 2004).

Desta forma, este trabalho apresenta três diferentes metodologias entre técnicas de monitoramento e modelagem hidrológica para a estimativa da infiltração de água em bacia hidrográfica. Primeiramente a técnica utilizada tem sido a análise de dados de escoamento de rios, onde a partir da vazão monitorada estima-se o escoamento superficial e a infiltração de água no solo (Yu et al. 1997; Rose 2004). Além da análise de dados hidrológicos é comum a calibração de modelos hidrológicos para a estimativa da parcela de água infiltrada durante um evento chuvoso. Assim, podemos citar um dos modelos mais conhecidos mundialmente o Soil Conservation Service – CN (NRCS-USDA, 2007). Além disso, modelos de base física e distribuídos integrados a um Sistema de Informação Geográfica podem tornar a infiltração em áreas heterogêneas mais próximas da realidade, como por exemplo, o modelo Limburg Soil Erosion Model (DE ROO et al., 1996).

O objetivo do trabalho foi avaliar três diferentes metodologias entre técnicas de monitoramento e modelagem matemática para a estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

Localizada na cabeceira do Rio Guaporé, a bacia do Arroio Lajeado Ferreira, possui área de captação de 1,19 Km².

O relevo local é ondulado na porção superior da bacia, e fortemente ondulado na porção intermediária. As principais classes de solos encontradas no local são os Argissolos, os Cambissolos e os Neossolos. O clima na região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cfb, ocorrendo chuvas distribuídas ao longo do ano, com uma precipitação pluvial média anual variando de 1250 a 2000 mm. O uso e manejo do solo são caracterizados pela cultura do tabaco no sistema cultivo mínimo (23,2 %), cultura do tabaco no sistema convencional (17,3 %), mata nativa (19,8 %), florestamento com eucaliptos (22,8 %), pastagens (6,6 %), sede (3,0 %), açudes (1,0 %) e capoeiras (6,3 %).

Monitoramento hidrossedimentométrico

A precipitação foi monitorada com o uso de dois pluviógrafos e cinco pluviômetros. Um pluviógrafo está localizado em um dos pontos mais alto da bacia, e seu intervalo de leitura é de 5 minutos; o segundo localizado na parte central da bacia com registros de 10 minutos. Os pluviômetros estavam distribuídos espacialmente na bacia, sendo que o acumulado monitorado equivale ao tempo de 24 horas. O nível do arroio Lajeado Ferreira foi monitorado com um linígrafo (sensor) de pressão (*Thalimedes* – OTT) instalado a uma calha *parshall*, com intervalos de tempo de cada leitura de 10 minutos. Aliado a isso, observações em uma régua linimétrica foram realizadas três vezes ao dia (9, 12 e 16 h) por um hidrotécnico.

Estimativa da infiltração

Small Scale Runoff Routing Model - SSRRM

Neste método, a infiltração para cada evento foi determinada pela subtração entre a precipitação e o escoamento superficial (Yu et al. 1997; Rose 2004), conforme a equação 1.

$$I_{ap} = P - Q_s \quad (1)$$

Onde: I_{ap} representa a infiltração total aparente de água no solo (mm), P é a precipitação total (mm), e Q_{sup} representa o escoamento superficial (mm), todos na escala de eventos.

O valor de I_{ap} é graficado num sistema cartesiano em função da precipitação pluvial do evento (P). A distribuição dos pontos no gráfico permitirá a obtenção de uma curva de formato exponencial com três regiões distintas, com a formação de um patamar que fisicamente representa a infiltração máxima da bacia (I_m), a partir da qual precipitações de maior volume não geram aumento na infiltração aparente medida.

Soil Conservation Service - CN

Este método é amplamente utilizado dado a sua parcimoniosidade, pois utiliza um único parâmetro para representar a variabilidade do tipo e uso do solo (NRCS-USDA, 2007). Neste caso, o escoamento superficial é estimado conforme a Equação 2:

$$Q_s = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

Onde: Q_s é o escoamento superficial (mm), P é a precipitação pluvial total do evento (mm), I_a representa as perdas iniciais (interceptação e armazenamento em depressões), sendo 20 % do valor de S , e S é o potencial máximo de armazenamento de água no solo (Equação 3), sendo CN um parâmetro adimensional (Curve-Number).

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (3)$$

Neste trabalho o valor de CN foi calibrado evento a evento, de forma a ajustar o valor de escoamento superficial calculado com o valor monitorado. Além disso, optou-se por separar os eventos em duas épocas, uma com maior cobertura vegetal e outra com pouca, Época I e II, respectivamente.

Limburg Soil Erosion Model - LISEM

O modelo hidrossedimentológico LISEM (DE ROO et al., 1996) é um dos primeiros de base física que é completamente integrado em um *raster* de Sistema de Informação Geográfica, permitindo a distribuição espacial das informações.

O modelo oferece mais de uma opção de modelos de infiltração, sendo que nesse trabalho optou-se pelo Green e Ampt (Equação 4) para duas camadas. Com o desencadeamento dos processos hidrológicos e sedimentológicos, tem-se no seu mecanismo a propagação do escoamento superficial e dos sedimentos pela propagação da onda cinemática, em direção ao exutório da bacia.

$$I(t) = K * t + \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (4)$$

Onde: $I(t)$ = infiltração acumulada em um determinado período de tempo (mm), K é condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), t representa o tempo, ψ_f representa o potencial matricial na frente de molhamento (mm), θ_s representa a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e θ_i representa a umidade inicial do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados finais de cada método utilizado, devido à falta de espaço maiores informações sobre como os três métodos foram

utilizados neste trabalho podem ser obtidos em Barros (2012).

A **figura 1** resume os resultados obtidos pelo modelo SSRRM, apresentando o gráfico de correlação entre P e I_{ap} . A parte inferior apresenta precipitações variando de 5 a 40 mm, onde os pontos seguem uma tendência linear com declividade 1:1 – neste caso as precipitações são baixas e praticamente ocorre a infiltração de todo o volume precipitado. A segunda região é intermediária e de transição, com precipitações variando de 40 a 100 mm, quando há uma maior dispersão dos pontos e a inflexão na tendência da reta. Na terceira região, com precipitações além de 100 mm, ocorre a formação de um patamar onde, mesmo com o aumento da precipitação pluvial, não ocorre aumento significativo na infiltração da bacia. Neste caso o valor obtido para I_m foi de 120 mm. No intervalo de precipitação pluvial entre 130 e 150 mm não houve registro de precipitação pluvial e, em razão disso, a estimativa da infiltração neste intervalo apresenta incerteza. Entretanto, a presença de dois eventos de grande magnitude (acima de 170 mm) indica uma tendência nesse trecho de grandes magnitudes.

Um importante resultado extraído do método da Curve-Number foi a variabilidade dos valores de S , que representa a máxima capacidade de infiltração nos eventos de precipitação pluvial, como pode ser visto na **tabela 1**. A partir dos valores de CN calibrados, determinou-se o parâmetro S , cujos valores mínimo, médio e máximo estão na **tabela 1**. Considerando o valor de S uma estimativa da infiltração de cada evento e comparando com os valores obtidos pelo método SSRRM, os resultados do método da Curve- Number superestimaram os valores de infiltração em, aproximadamente, 1,8 vezes.

A simulação dos processos hidrológicos pelo modelo LISEM ocorreu para duas camadas, em vista da diferença entre as propriedades do solo na camada superficial e subsuperficial, encontradas na bacia de Arvorezinha. Contudo, o modelo não incorpora as áreas de afluência variável ou saturadas na formação do escoamento superficial, sendo estas muitas vezes as de maior importância na formação de tal processo (Mendonço & Tucci, 1997), desta maneira, na simulação realizada pelo LISEM a formação do escoamento superficial é devido ao escoamento hortoniano.

Na **tabela 2** são apresentados os valores de precipitação, escoamento superficial e a infiltração de água no solo, em um conjunto de 10 eventos, obtidos no LISEM e também aqueles obtidos pelos outros métodos. O modelo LISEM e o SSRRM apresentaram boa aproximação entre seus valores de infiltração durante eventos. Em relação aos

valores obtidos na calibração do modelo CN em relação ao LISEM, esse superestimou 7 dos 10 eventos a infiltração, subestimou 1 evento e para os eventos 3 e 7 o CN não simulou a formação do escoamento superficial ao compararmos os três (**Tabela 2**).

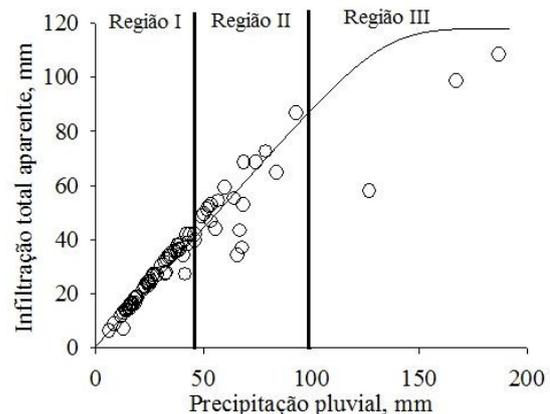


Figura 1: Relação entre a infiltração aparente total e a precipitação pluvial dos eventos monitorados.

Tabela 1: Valores dos parâmetros CN e S , encontrados no conjunto de eventos utilizados, nas épocas I e II.

Época	Variável	Mínimo	Média	Máximo	Mediana	Desvio padrão	CV (%)
1	S (mm)	44,8	105,6	199,6	103,7	40,8	38,7
1	CN (mm)	56,0	70,7	85,0	70,0	7,6	10,7
2	S (mm)	34,7	134,8	286,4	116,8	54,7	40,6
2	CN (mm)	47,0	66,8	88,0	68,0	9,9	14,8

CV: coeficiente de variação

Uma possível explicação pela aproximação dos valores entre SSRRM e LISEM é o fato dos modelos incorporarem alguns mecanismos iguais como a teoria clássica de Green e Ampt, onde a taxa de infiltração é geralmente muito alta no início do evento e depois diminui até a taxa máxima de infiltração ser obtida. Todavia, o LISEM por ser de base física engloba outros processos importantes que o SSRRM não incorpora, como por exemplo, a interceptação e armazenamento em microdepressões, que tem relação direta com infiltração de água no solo. Isto pode ser percebido pelos valores da **tabela 2**, onde 9 dos 10 eventos o LISEM apresentou valores menores de infiltração em relação ao SSRRM, o que reflete na parte da chuva armazenada e/ou interceptada. Todavia, percebe-se que os valores de interceptação e/ou armazenamento da água nas microdepressões são relativamente pequenos quando comparados aos valores infiltrados. De forma que os valores de

infiltração foram muito próximos entre LISEM e SSRRM.

Não obstante chama-se a atenção o valor utilizado, ressalva-se o fato de não ter dados medidos, de 20 % de la pelo método SCS - CN. Uma vez, que se observa pela modelagem matemática (uso do LISEM) que os valores de perdas iniciais (interceptação + armazenamento em microdepressões) foram baixos, menores que 20 % em 7 dos 10 eventos. O uso do la de 20 % também pode ter comprometido um melhor desempenho do método SCS - CN, uma vez que na bacia de Arvorezinha temos variabilidade da cobertura sob o solo durante o ano, que pode interferir na interceptação. Assim, estes resultados confirmam que devido a variabilidade do uso do solo durante o ano seria necessário que o valor do parâmetro la seja diferente do utilizando pelo método tradicional do método CN (Endale et al., 2011).

CONCLUSÕES

O conjunto de dados permitiu a estimativa da infiltração de água no solo durante eventos na escala de bacia hidrográfica.

O uso do modelo SSRRM, baseado em técnicas de monitoramento da vazão e precipitação apresenta-se como uma ferramenta simples e representativa da infiltração em escala de bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

BEVEN, K.J. & KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24:43-69, 1979.

BARROS, C.A.P. Comportamento Hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 189p. (Dissertação de Mestrado)

LANGHANS, C.; GOVERS, G.; DIELS, J.; CLYMANS, W. & VAN DEN PUTTE, A. Dependence of effective hydraulic conductivity on rainfall intensity: loamy agricultural soils. *Hydrol. Process.*, 24:2257-2268, 2010.

MENDIONDO, E.M. & TUCCI, C.E.M. Escalas hidrológicas. II: diversidades de procesos na bacia vertente. *R. Bras. Rec. Hídricos*, 2:81-100, 1997.

ROSE, C. An Introduction to the environmental physics of soil, water and watersheds. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 442p.

DE ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. J. E.; CREMERS, N. H. D. T. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: II. Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, v. 10, 1119-1126, 1996.

ENDALE, D.M.; SCHOMBERG, H. S.; FISHER, D. S.; JENKINS, M. B. No-till and Curve Numbers – a closer look, *Proceedings of 2011 Georgia Water Resources Conference*, April 11–13, 2011, at The University of Georgia.

United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. Chapter 7: Hydrologic soil groups. In: *USDA-NRCS, National Engineering Handbook: Part 630*. Washington, USDA-NRCS, USA, 2007.

YU, B.; ROSE, C.W.; COUGHLAN, K.J.; FENTIE, B. Plot-Scale Rainfall-Runoff Characteristics and modeling at six sites in Australian and Southeast Asia, *Soil & Water*, v. 40, p. 1295-1303, 1997.

Tabela 2: Valores de precipitação, escoamento superficial, infiltração de água no solo para os três métodos de estimativa da infiltração de água no solo.

Evento	Data	Duração h	P ⁽¹⁾ -----mm-----	Q _{sup} ⁽²⁾	Infiltração (mm)		
					LISEM	SSRRM	CN
1	03.01.10	45,83	187,3	79,0	132,3	108,3	114,1
2	22.03.10	10,50	36,7	1,1	33,95	35,6	119,5
3	24.07.10	9,16	17,4	1,0	15,5	16,4	142,9*
4	12.08.10	14,66	18,95	0,3	17,45	18,65	71,6
5	07.10.10	7,16	27,1	0,2	25,3	26,9	108,85
6	22.04.11	10,83	40,85	6,7	31,8	34,2	75,8
7	11.05.11	8,00	14,9	1,1	12,7	13,7	136,7*
8	17.06.11	13,50	33,4	0,9	28,7	32,5	114,1
9	20.07.11	39,16	127,0	69,1	46,7	57,9	71,6
10	08.08.11	16,00	64,2	9,0	55,55	55,1	125,1

⁽¹⁾P: precipitação total; ⁽²⁾Q_{sup}: escoamento superficial; LISEM: Limburg Soil Erosion Model; SSRRM: Small Scale Runoff Routing Model; CN: método curve-number; *Esses eventos não apresentaram formação do escoamento superficial pelo método CN, mesmo assim foi estimado seu valor S (capacidade máxima infiltração de água no solo).